

CONTROLE NEUROFUZZY PARA RODAS ELÉTRICAS TRASEIRAS EM VEÍCULOS DE PASSEIO CONVERTIDOS EM VEÍCULOS HÍBRIDOS 4X4

Rafael Coronel Bueno Sampaio, rafaalc@sc.usp.br¹
Jussara Ribeiro, jussara.jsr@gmail.com¹
Vinicius Leite Lemos, vl-lemos@uol.com.br¹
Marcelo Becker, becker@sc.usp.br¹
Glauco Augusto de Paula Caurin, gcaurin@sc.usp.br¹

¹Mechatronics Lab-SEM-EESC-USP, Departamento de Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/ USP - Av. do Trabalhador São-Carlense 400, Pq. Arnold Schimidt - CEP:13566-590 - São Carlos - SP/ Brasil

Resumo. Considerando a crescente demanda por sistemas motorizados alimentados por energia "limpa", o presente trabalho descreve o projeto de um sistema de controle de rodas elétricas para veículos de passeio pré-existentes convertidos em veículos híbridos 4x4, dotados de tração elétrica traseira independente para manobras a velocidades indicadas para perímetro urbano (abaixo de 60 Km/h), preservando-se o motor a combustão na tração dianteira, o qual pode ser aproveitado nas demais situações. Essa configuração pode se tornar uma alternativa viável para a indústria automobilística, aperfeiçoando o desempenho veicular na redução do consumo de combustível de origem fóssil em tais situações de tráfego, onde a emissão de poluentes ocorre com maior intensidade. O estudo faz uma análise da dinâmica e da cinemática do veículo em 2D utilizando-se da Geometria de Ackerman, o que permitiu estimar o raio da manobra executada através da leitura dos sensores de esterçamento das rodas dianteiras do veículo. A partir do raio de curva obtido, o controlador calcula as velocidades angulares que cada uma das rodas traseiras deve desenvolver individualmente e, por meio do controle de corrente, ajusta as velocidades angulares dos dois motores elétricos acoplados às mesmas, de maneira que o veículo apresente um comportamento adequado em manobras, atendendo aos requisitos de estabilidade. Desenvolveu-se um modelo parametrizado do veículo em simulador, incluindo o estudo da sua dinâmica/cinemática em Matlab/Simulink. O projeto do sistema de controle baseou-se em técnicas de inteligência artificial, considerando-se o desenho de um controlador fuzzy para o ajuste das velocidades das rodas. Posteriormente, uma rede neural feedforward de quatro camadas foi treinada de modo a substituir as ações do controlador.

Palavras-chave: Veículo Híbrido, Dinâmica Veicular, Modelagem, Mecatrônica, Controle Neurofuzzy

1. INTRODUÇÃO

O conceito de veículo híbrido preenche uma enorme lacuna na busca por meios de transporte que reduzam a emissão de poluentes na atmosfera. Segundo um estudo (Sioshansi *et al.*, 2009), os veículos de passeio do tipo PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*), cujas células de bateria são recarregáveis em "postos" de energia elétrica, emitem menos CO_2 e outros poluentes que os CV (*Conventional Vehicles*) e até mesmo que os carros híbridos HEV (*Hybrid Electric Vehicles*). No transporte público, a hibridização dos ônibus associada ao uso de super capacitores acarretaria a recuperação de cerca de 40% da energia fornecida a esses veículos (Barrero *et al.*, 2008). Embora haja uma grande gama de soluções robustas para problemas dinâmicos, a complexidade do controlador aumenta à medida que as condições de contorno e os pré-requisitos de projeto também aumentam, o que gera um acréscimo significativo na demanda por processamento (Kumar *et al.*, 2009). Este trabalho apresenta o desenho de um controlador fundamentado em inteligência artificial, da classe neurofuzzy (Cai *et al.*, 2010), apoiado pela ideia de que, combinando-se a facilidade de agregar conhecimento através da lógica nebulosa e o relativamente baixo custo computacional oferecido pela abordagem das redes neurais, torna-se possível solucionar diversos problemas em engenharia de controle (Cristea *et al.*, 2002). O desenho da rede neural de quatro camadas seguiu o trabalho de (Kurosawa, 2005). As redes neurais de quatro camadas apresentam um desempenho superior às redes de três camadas (Tamura, 1997). Um modelo simplificado da dinâmica do veículo é apresentado (Becker, 1997). São estabelecidas relações, baseadas na Geometria de Ackerman, a partir das quais foram determinadas as velocidades angulares a serem desenvolvidas pelas rodas elétricas em manobras, de modo que o veículo atenda aos níveis de estabilidade exigidos (Gillespie, 1992). Para o sistema de tração, foi considerada a representação em

espaço de estados de um motor DC de aproximadamente 5HP, modelado segundo técnicas laboratoriais (Levine, 1999).

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Aspectos gerais

O veículo híbrido modelado neste trabalho consiste de um carro de passeio tracionado por um motor a combustão convencional na sua porção dianteira, e por um par de motores elétricos na sua parte traseira. A tração traseira, portanto, se dá por meio de dois motores elétricos independentes havendo, *a priori*, um par de controladores MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), cada qual para o ajuste das velocidades angulares desses dispositivos. A ilustração da Fig. 1 mostra o funcionamento do sistema. Os ângulos de esterçamento das rodas dianteiras δ_1 e δ_2 são lidos através do barramento CAN (*Controller Area Network*) do veículo (A) e enviados ao controlador (B) que, após resolvidas as equações dinâmicas e cinemáticas do veículo, obtém as velocidades angulares desejadas para as rodas traseiras, assumindo o controle de corrente dos motores elétricos acoplados a elas, o que resulta no controle das velocidades angulares (ω_1 e ω_2) (C).

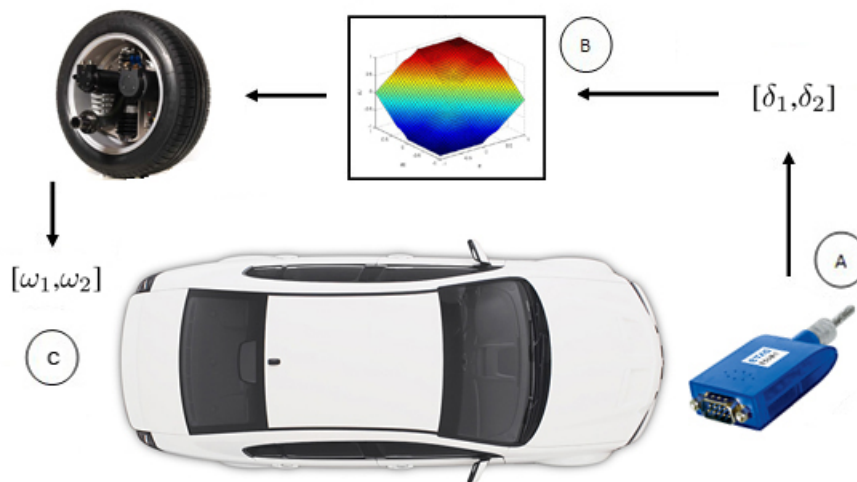


Figura 1. Arquitetura do veículo e fluxo da informação para o controle das rodas elétricas.

Muitos trabalhos na área de veículos elétricos/híbridos sugerem o desenvolvimento de veículos com esterçamento frontal e traseiro simultaneamente. Em se tratando de projetos de veículos concebidos e desenvolvidos a partir da "estaca zero", tal funcionalidade pode ser incorporada ainda em fase de projeto. O grande diferencial deste trabalho é projetar um dispositivo eletro-mecânico controlado que possa ser adaptado em veículos de passeio convencionais já comercializados. Assim, um dos requisitos principais de projeto demanda que as rodas traseiras convencionais sejam substituídas pelas rodas elétricas sem que isso demande de altos níveis de adaptação. Desse modo, uma de suas implicações é a impossibilidade da utilização de rodas esterçáveis no eixo traseiro, uma vez que a própria estrutura dos carros de passeio comercializados não contempla essa funcionalidade.

O problema de controle aqui descrito enfoca um estudo preliminar da Geometria de *Ackerman* na análise do comportamento das rodas traseiras do carro quando em velocidades para perímetro urbano. Estando o veículo sujeito a manobras, deseja-se efetuar o controle da velocidade angular de cada uma das rodas elétricas traseiras, de maneira que o veículo atenda aos níveis de desempenho tanto em curvas quanto em movimento de translação.

2.2 Modelagem da dinâmica e da cinemática do veículo: obtenção do modelo parametrizado

A obtenção de um modelo dinâmico 2D para o veículo utilizou uma versão simplificada da Geometria de *Ackerman*. Considerou-se as relações geométricas próprias de um veículo de passeio de quatro rodas, dotado de esterçamento frontal, como pode ser observado através da Fig. 2. No esquemático, $\delta_{1,2}$ são os ângulos de esterçamento, $\beta_{1,2}$ são os ângulos entre a direção de movimento e a direção do rolamento (torque auto-alinhante), b é o comprimento dos eixos (supondo eixos de mesmo comprimento), L é a distância entre eixos, l_1 e l_2 são, respectivamente, as distâncias do C. G. do veículo aos eixos dianteiro e traseiro. O raio do centro de curvatura relativo ao C.G. do veículo é dado por R_{cg} , R é o raio do centro de curvatura relativo à distância média do eixo traseiro, R_1 e R_2 são as distâncias entre o centro de curvatura e as rodas traseiras esquerda e direita, respectivamente. As velocidades linear e angular relativas ao C.G. do carro são, respectivamente, V_{cg} e ω_z . As forças longitudinais que surgem nos pneumáticos dianteiros, como resultado da transferência de potência pelo motor a combustão são representadas por $U_{1,2}$. Já as forças longitudinais que surgem nos pneumáticos traseiros, resultantes da transferência de potência pelos motores elétricos, são representadas por $U_{3,4}$.

As forças transversais atuantes nas quatro rodas são expressas por $S_{1..4}$. A potência que os motores elétricos esquerdo e direito transmitem às rodas traseiras são, respectivamente, $P_3(t)$ e $P_4(t)$. O motor a combustão transmite as potências $P_1(t)$ e $P_2(t)$ às rodas dianteiras esquerda e direita, respectivamente.

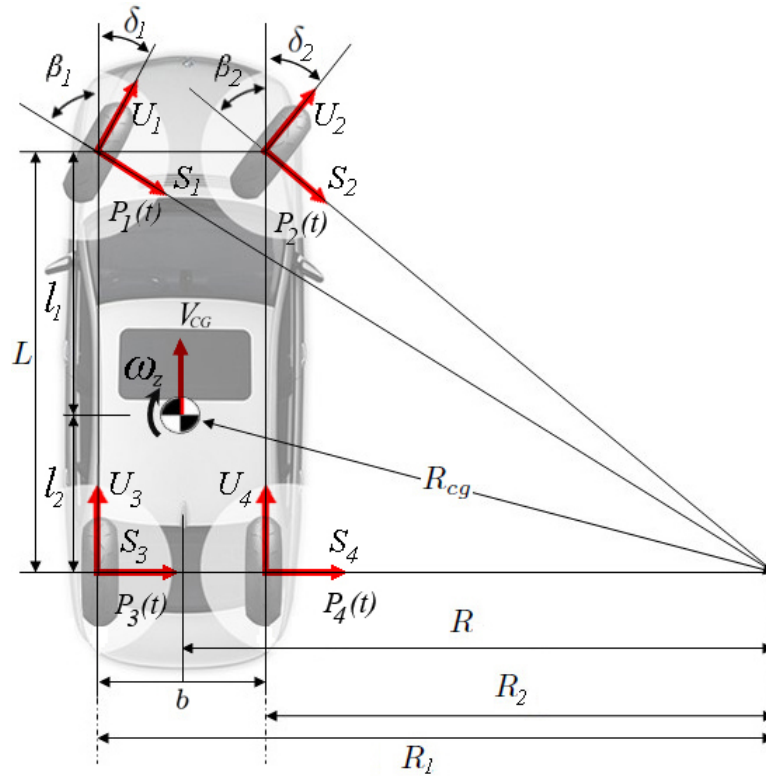


Figura 2. Geometria de esterçamento, através das quais se determinam a dinâmica e a cinemática do veículo parametrizado.

Efetuada-se uma análise do diagrama de corpo livre do veículo da Fig. 2, chega-se às seguintes equações:

$$\dot{V}_x = \frac{1}{m} (U_3 + U_4 + U_1 \cos \delta_1 + U_2 \cos \delta_2 - S_1 \cos \beta_1 - S_2 \cos \beta_2) + V_y \omega_z \quad (1)$$

$$\dot{V}_y = \frac{1}{m} (S_3 + S_4 + S_1 \sin \beta_1 + S_2 \sin \beta_2 + U_1 \sin \delta_1 + U_2 \sin \delta_2) - V_x \omega_z \quad (2)$$

$$\omega_z = \frac{1}{I_z} \left[\frac{b}{2} (U_3 - U_4) + l_1 (U_1 \sin \delta_1 + U_2 \sin \delta_2) - l_2 (S_3 + S_4) + l_1 (S_1 \sin \beta_1 + S_2 \sin \beta_2) + \dots \right. \\ \left. \frac{b}{2} (U_1 \cos \delta_1 - U_2 \cos \delta_2 + S_2 \cos \beta_2 - S_1 \cos \beta_1) \right] \quad (3)$$

Onde I_z é o momento de inércia sobre o eixo z e m é a massa do veículo. As forças que atuam nas rodas, de modo longitudinal à direção do ângulo de esterçamento, e que estão contidas nas equações (1), (2) e (3) são dadas por:

$$U_1 = U_2 = -\frac{\mu m g l_2}{2L} \quad (4)$$

$$U_3 = \frac{P_3(t)}{(V_x + \frac{b}{2} \omega_z)} - \frac{\mu m g l_1}{2L} \quad (5)$$

$$U_4 = \frac{P_4(t)}{(V_x - \frac{b}{2} \omega_z)} - \frac{\mu m g l_1}{2L} \quad (6)$$

Onde o coeficiente de atrito dinâmico relativo ao contato entre o pneumático e o pavimento é dado por μ , e g é a aceleração da gravidade no C.G. do veículo. Para este caso em específico, onde somente os motores elétricos conduzem o

veículo, as forças $U_{1,2}$ não consideram as potências $P_1(t)$ e $P_2(t)$, restando apenas as forças de oposição ao movimento na porção dianteira do veículo, relativas ao contato dos pneumáticos e o pavimento, conforme a Eq. (4). As forças transversais atuantes nas rodas, e que também estão contidas nas equações (1), (2) e (3), são dadas por:

$$S_1 = C_{\psi F} \left(\delta_1 - \frac{V_y + l_1 \omega_z}{V_x + \frac{b}{2} \omega_z} \right) \quad (7)$$

$$S_2 = C_{\psi F} \left(\delta_2 - \frac{V_y + l_1 \omega_z}{V_x - \frac{b}{2} \omega_z} \right) \quad (8)$$

$$S_3 = -C_{\psi T} \left(\frac{V_y - l_2 \omega_z}{V_x + \frac{b}{2} \omega_z} \right) \quad (9)$$

$$S_4 = -C_{\psi T} \left(\frac{V_y - l_2 \omega_z}{V_x - \frac{b}{2} \omega_z} \right) \quad (10)$$

Onde C_{ψ} é o coeficiente de escorregamento dos pneumáticos, sendo os índices T e F relativos às rodas traseiras e dianteiras, respectivamente.

Objetivando-se um comportamento adequado em curvas (Gillespie, 1992), os ângulos das rodas dianteiras precisam atender a relação de *Ackerman* a seguir:

$$\delta_1 = \arctg \left(\frac{L}{R_{cg} + \frac{b}{2}} \right) \approx \left(\frac{L}{R_{cg} + \frac{b}{2}} \right) \quad (11)$$

$$\delta_2 = \arctg \left(\frac{L}{R_{cg} - \frac{b}{2}} \right) \approx \left(\frac{L}{R_{cg} - \frac{b}{2}} \right) \quad (12)$$

Uma vez conhecidos os ângulos de esterçamento δ_1 e δ_2 , a partir das Eqs. (11) e (12), obtém-se R_{cg} . Ainda da Fig. 2, geometricamente, extraem-se as seguintes relações:

$$R_1 = \sqrt{R_{cg}^2 - l_2^2} + \frac{b}{2} \quad (13)$$

$$R_2 = \sqrt{R_{cg}^2 - l_2^2} - \frac{b}{2} \quad (14)$$

Considerando-se o veículo como corpo rígido, pode-se afirmar que a velocidade angular ω_z sobre o C.G. do mesmo vale para todo os pontos. Assim:

$$\omega_z = \frac{V_{cg}}{R_{cg}} \quad (15)$$

Desse modo:

$$V_1 = \omega_z R_1 \quad (16)$$

$$V_2 = \omega_z R_2 \quad (17)$$

Substituindo-se (15) em (16) e (17), tem-se:

$$V_1 = V_{cg} \frac{R_1}{R_{cg}} \quad (18)$$

$$V_2 = V_{cg} \frac{R_2}{R_{cg}} \quad (19)$$

Do ponto de vista do pneumático, pode-se afirmar que as velocidades angulares de cada um deles é dada por:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{r} \quad (20)$$

$$\omega_2 = \frac{V_2}{r} \quad (21)$$

Onde ω_1 e ω_2 são as velocidades angulares das rodas esquerda e direita, respectivamente, e r representa o raio do pneu. Das relações acima, finalmente obtém-se as velocidades angulares das rodas traseiras direita e esquerda, respectivamente:

$$\omega_1 = \frac{V_{cg}}{rR_{cg}} \left[\sqrt{R_{cg}^2 - l_2^2} + \frac{b}{2} \right] \quad (22)$$

$$\omega_2 = \frac{V_{cg}}{rR_{cg}} \left[\sqrt{R_{cg}^2 - l_2^2} - \frac{b}{2} \right] \quad (23)$$

2.3 Identificação do modelo dinâmico do motor elétrico

Para a determinação das equações dinâmicas dos motores DC considerados para o problema, foi necessária a identificação dos seus parâmetros eletromecânicos através de técnicas de bancada (Levine, 1999). O vetor de estados do dispositivo é definido como $x = [\omega \quad \dot{\omega}]^T$, e suas equações dinâmicas são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \quad (24)$$

Onde

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-1}{\tau_1\tau_2} & \frac{\tau_1+\tau_2}{\tau_1\tau_2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_m}{\tau_1\tau_2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (27)$$

$$D = [0] \quad (28)$$

Onde A , B , C e D referem-se às matrizes de parâmetros de ganhos e polos do sistema, relacionados às constantes eletromecânicas do motor (τ_1 , τ_2 e K_m).

3. PROJETO DO CONTROLADOR NEUROFUZZY

3.1 Estabelecimento da base de regras de conhecimento para o controlador fuzzy

O controle executado pela lógica fuzzy é baseado em regras ao invés de um controle restrito ao modelo matemático do veículo. Esta abordagem mostra-se útil, uma vez que, ainda que de posse de um modelo confiável, as não-linearidades do sistema frequentemente surgem em tempo de execução das manobras. Em se tratando do controle de duas rodas que atuam independentemente uma da outra, foram concebidos dois sistemas de controle distintos. Considera-se as entrada do controlador fuzzy como sendo o erro da velocidade angular da roda (E) e também sua derivada (dE). A saída caracteriza-se pela ação de controle fuzzy (dU). O conjunto fuzzy envolve a representação e o trabalho com notações linguísticas, tanto das entradas como das saídas, utilizando as seguintes variáveis:

- NL: *Negative Large* - Altamente Negativo;
- NM: *Negative Medium* - Medianamente Negativo;
- NS: *Negative Small* - Pouco Negativo
- Z: *Zero* - Zero;
- PS: *Positive Small* - Pouco Positivo;
- PM: *Positive Medium* - Medianamente Positivo;
- PL: *Positive Large* - Altamente Positivo

Tais variáveis apresentam o seguinte significado: conjunto Z indica que a faixa de erro onde a velocidade se encontra é tolerável, compatível com o nível de estabilidade pré-definido. Os conjuntos PL, PM e PS indicam que a velocidade angular medida encontra-se em uma faixa abaixo da velocidade desejada. Já os conjuntos NL, NM e NS indicam que a velocidade angular medida encontra-se em uma faixa acima da velocidade de referência. A saída do controlador recebe o mesmo *status*. As ações de controle podem ser tanto um acréscimo (PS, PM e PL) como um decréscimo (NS, NM e NL) no sinal de controle. Foram definidas 49 regras fuzzy, conforme ilustrado na Fig. 3.

		dE								
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL		
E	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z	dU	
	NM	NM	NM	NM	NM	NS	Z	PS		
	NS	NL	NM	NS	NS	Z	PS	PM		
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM		
	PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PM		
	PM	NS	Z	PS	PM	PM	PM	PL		
	PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL		
			dU							

Figura 3. Regras fuzzy estabelecidas para o controle de velocidade das rodas elétricas. A partir do erro E e da sua derivada dE há uma ação de controle dU correspondente.

3.2 Processo de treinamento da rede neural *feedforward*

Como já foi discutido, quando bem projetadas, redes neurais apresentam um desempenho bastante atraente em termos da baixa demanda por processamento. Em especial, redes neurais *feedforward* são indicadas em problemas de classificação, onde cada vetor de entrada é associado a um vetor de saída (Cirstea *et al*, 2002). Essa premissa encaixa-se perfeitamente no problema de controle de rotação das rodas elétricas pois, para cada vetor de entrada contendo os dados de E e dE , haverá um vetor contendo o valor de dU correspondente.

Foi implementada uma rede *feedforward* de quatro camadas com $(N/2) + 3$ camadas ocultas, cujo modelo completo é apresentado na Fig. 4 (Kurosawa, 2005). Essa configuração apresenta uma performance superior a rede de três camadas no que diz respeito ao número de parâmetros necessários para o seu treinamento (Tamura, 1997). Assim, foram fornecidos um par de valores de entrada $x = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)})$ representados pelo erro de posição E e sua derivada dE , e também uma saída $y = y_1^{(k)}$, representada pelo respectivo acréscimo/decréscimo na ação de controle. Foi utilizado um *toolbox* em ambiente MATLAB devidamente configurado com o algoritmo de *Levenberg-Marquard*. A performance de treinamento atendeu aos requisitos de MSE (*Mean Square Error*).

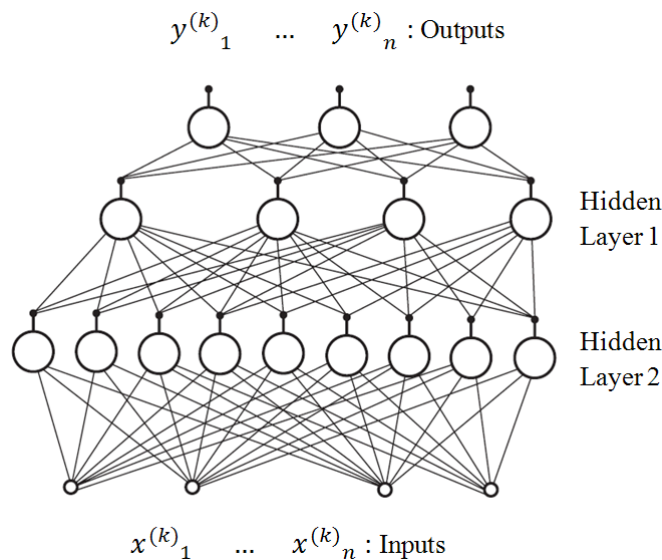


Figura 4. Modelo generalizado de arquitetura da rede neural *feedforward*.

4. RESULTADOS EM SIMULAÇÃO

A etapa final do *design* da rede neural consistiu a sua validação, que pôde ser realizada observando-se as curvas de regressão relativas ao seu treinamento, conforme ilustrado na Fig. 5.

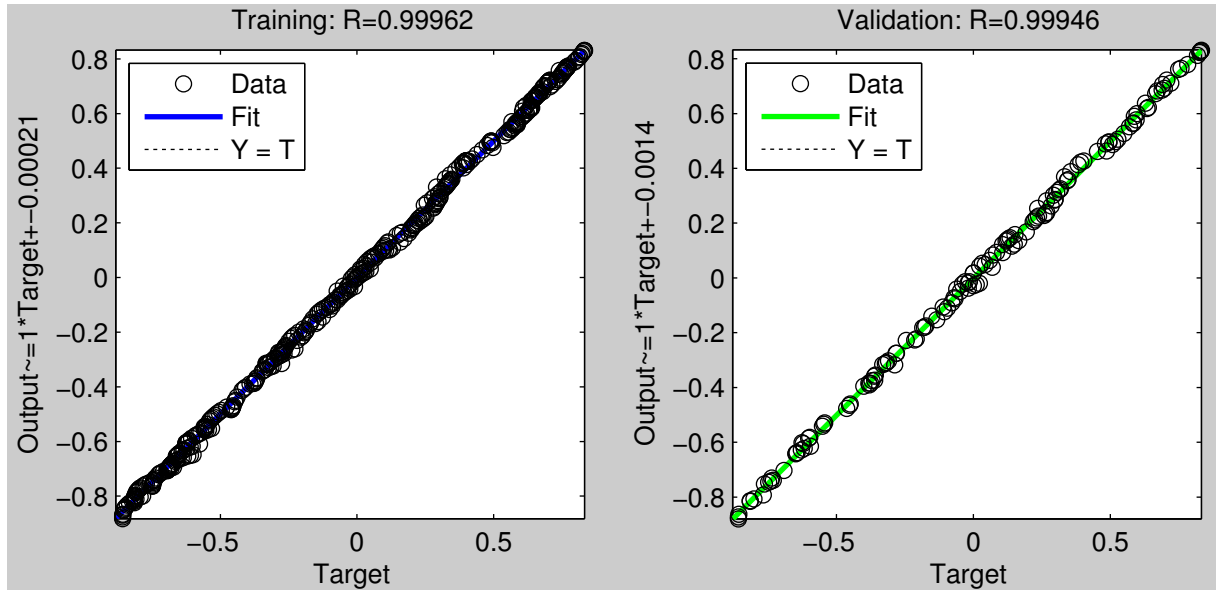


Figura 5. Curvas de regressão e de minimização, obtidas após treinamento da rede neural com base na superfície de controle fuzzy, indicando que o processo de aprendizagem convergiu para os valores esperados.

Em seguida, e mais importante, a reconstrução da superfície fuzzy pela rede neural treinada é um forte indicativo de que o processo de treinamento foi executado com sucesso. A Fig. 6 mostra, à esquerda (A), a superfície gerada após a implementação dos conjuntos fuzzy e da base de regras de controle. À direita da figura (B) encontra-se a superfície fornecida pela rede neural *feedforward*, devidamente treinada. Nota-se claramente que a rede *feedforward* de quatro camadas reconstruiu a superfície fuzzy com êxito, fornecendo ações de controle bastante coerentes comparadas às ações de controle fuzzy. Neste caso, foram fornecidos todos os valores de E e dE à rede neural que, por sua vez, calculou os respectivos valores de dU , tal qual o controlador fuzzy.

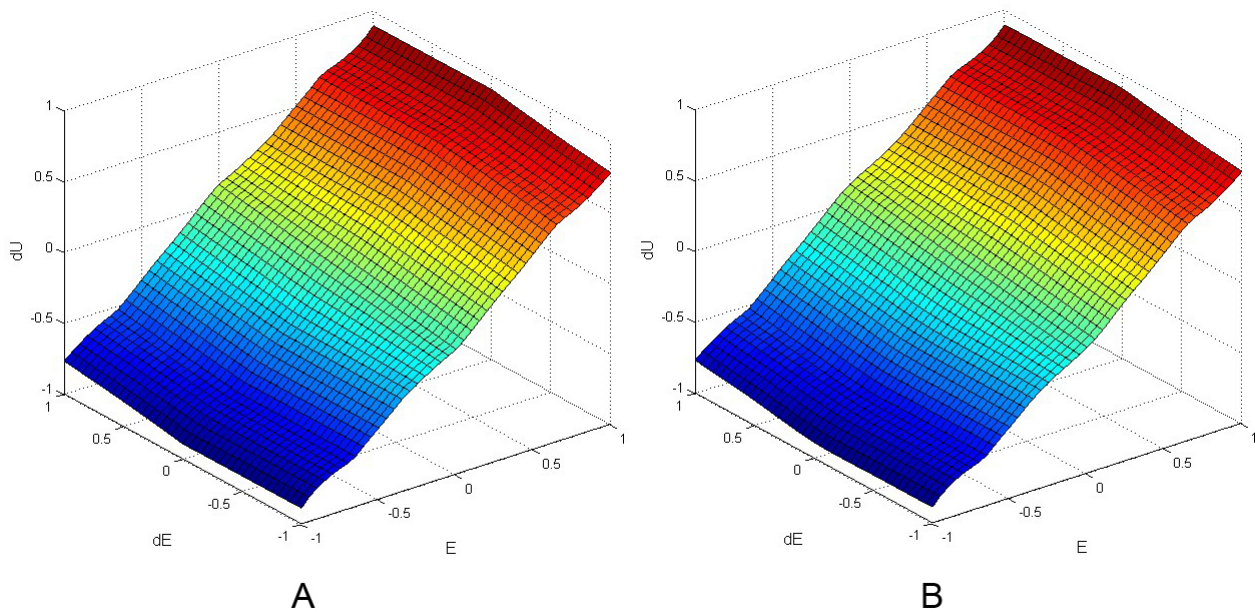


Figura 6. Superfície de controle obtida após o estabelecimento das regras de controle fuzzy (A) e superfície reconstruída pela rede neural devidamente treinada (B).

O então obtido controlador neurofuzzy foi submetido a algumas simulações, compatíveis às situações encontradas em trânsito, como por exemplo a solicitação de mudança de raio de curvatura em tempo de manobra, como consequência do esterçamento realizado pelo motorista. A Fig. 7 exibe o resultado de uma dessas solicitações, onde também foi testado um controlador PID clássico. É importante salientar que a análise comparativa do controlador neurofuzzy com um controlador clássico leva em consideração que este último é sintonizado uma única vez (Método de *Ziegler-Nichols*), não tendo seus ganhos dinamicamente reconfigurados para atender as diversas variações de operação do veículo. Isso significa que, dependendo das condições de operação, o controlador PID provavelmente poderá não responder como esperado. Além de responder bastante satisfatoriamente às diversas condições de manobras, o controlador neurofuzzy atenuou possíveis sobre-sinais (*overshoot*) e erro de regime.

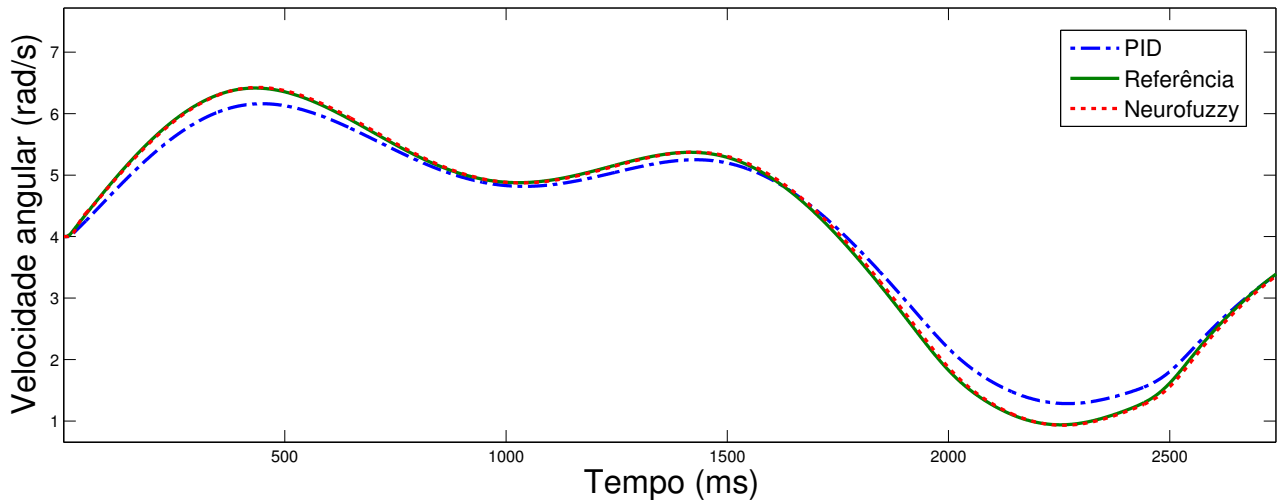


Figura 7. Resposta do controlador neurofuzzy no ajuste da velocidade angular da roda elétrica frente a solicitação de diferentes raios de curvatura, para velocidades em perímetro urbano (até 60 Km/h).

Foram testadas, também, as respostas do controlado neurofuzzy para solicitações em degrau, com amplitudes variáveis, o que pode ser relacionado a testes mais extremos para a avaliação da capacidade e da velocidade de resposta por parte do controlador a mudanças bruscas de raio de manobra. A Fig. 8 mostra, novamente, que o controlador desenhado atende às diversas demandas de manobra, minimizando novamente o erro de regime.

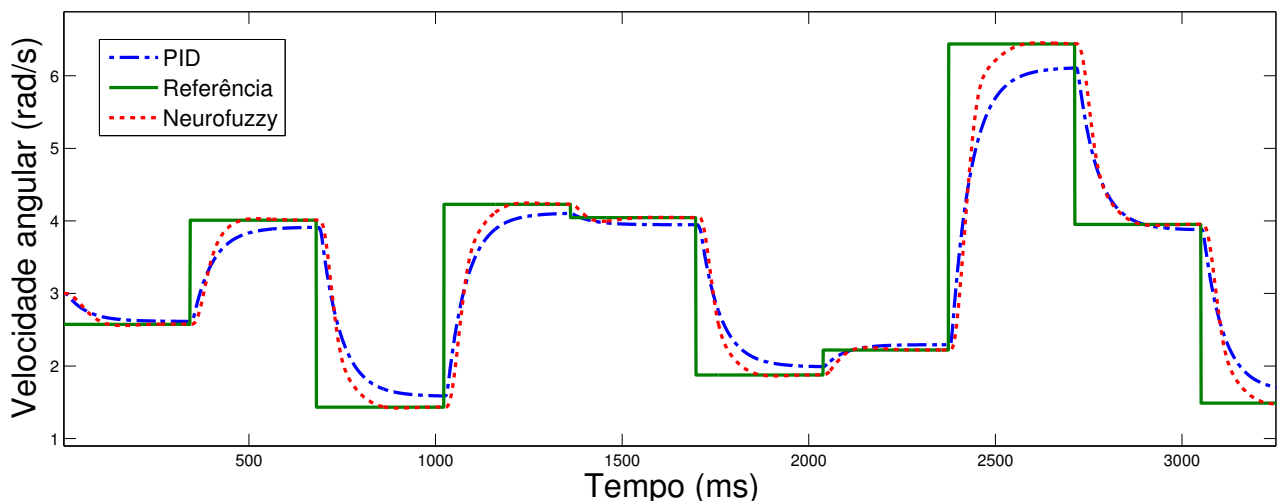


Figura 8. Resposta do controlador neurofuzzy no ajuste da velocidade angular da roda elétrica frente a variações mais bruscas dos raios de curvatura em manobras para velocidades em perímetro urbano (até 60 Km/h).

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O controlador neurofuzzy desenhado atendeu as expectativas iniciais de projeto com relação ao controle das rodas elétricas mais eficientemente que os controladores clássicos, o que significa afirmar que o levantamento das regras de controle e o processo de inferência se deram de maneira bastante precisas. Da mesma forma, o processo de treinamento da rede neural *feedforward* de quatro camadas mostrou que é possível, através da abordagem neurofuzzy, se projetar um controlador baseado em inteligência artificial para a solução do problema de ajuste das rodas elétricas.

O controlador projetado será embarcado em uma veículo-plataforma em miniatura que vem sendo montado na USP/EESC. O veículo já encontra-se adaptado para reproduzir a Geometria de *Ackerman* onde, através da leitura dos ângulos de esterçamento por meio de *encoders*, são calculadas as velocidades desejadas para as rodas elétricas.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem o apoio da CPFL, ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica e Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial-FIPAI.

7. REFERÊNCIAS

- Barrero, R., Mierlo, J., Tackoen, X., *Energy savings in public transport*, Vehicular Technology Magazine, IEEE, 3, 26-36, 2008
- Becker, M., *Estudo sobre Robôs de Locomoção: Formas Construtivas, Dirigibilidade e Controle*, UNICAMP, 1999
- Cai, L., Rad, A., Chan, W. L., *An Intelligent Longitudinal Controller for Application in Semiautonomous Vehicles Industrial Electronics*, IEEE Transactions on, 57, 1487-1497, 2010
- Cirstea, M.N., Dinu, A., Khor, J., McCormick, M., *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems*, Elsevier Science, 2002
- Gillespie, T. D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International, 1992
- Kumar, M. V., Suresh, S., Omkar, S. N., Ganguli R., Sampath, P., *A Direct Adaptive Neural Command Controller Design for an Unstable Helicopter*, Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, Elsevier Science, Oxford, 2009.
- Kurosawa, K., Futami, R., Watanabe, T., Hoshimiya, N., *Joint Angle Control by FES Using a Feedback Error Learning Controller Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 13, 359-371, 2005
- Levine, W. S., *Control System Fundamentals*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 1999
- Sioshansi, R., Denholm, P., *Emissions Impacts and Benefits of Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Vehicle-to-grid Services*, Environmental Science and Technology, 43, 1199-1204, 2009
- Tamura, S., Tateishi, M., *Capabilities of a Four-Layered Feedforward Neural Network: Four Layers Versus Three*, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 8, 2, 1997

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NEUROFUZZY CONTROL IN 4X4 HYBRID-CONVERTED TOURING VEHICLES DURING URBAN SPEED STEERING MANEUVERS

Rafael Coronel Bueno Sampaio, rafaalc@sc.usp.br¹

Jussara Ribeiro, jussara.jsr@gmail.com¹

Vinicius Leite Lemos, vl-lemos@uol.com.br¹

Marcelo Becker, becker@sc.usp.br¹

Glauco Augusto de Paula Caurin, gcaurin@sc.usp.br¹

¹Mechatronics Lab-SEM-EESC-USP, Department of Mechanical Engineering - School of Engineering of São Carlos - EESC/ USP - Av. Trabalhador Sao-Carlense, 400 - Pq. Arnold Schimidt - Zip Code: 13566-590 - São Carlos - SP/ Brazil

Resumo. *Considering the growing demand for clean energy-motorized systems, the present work describes the development of a control system for rear traction in 4X4 hybrid-converted conventional vehicles during urban speed limits (lower than 60 Km/h), preserving the conventional combustion motor which can still be used at higher speeds. This set represents a practicable alternative for the automotive industry, improving vehicular performance conditions, for instance, reducing considerably fossil fuel air pollution. In this essay we analyze the 2D vehicle both dynamics and kinematics by Ackerman geometry, through which it was possible to estimate the maneuver radius of front wheels. From the obtained parameter the controller calculates both rear wheel individual angular speeds by means of current control for the two electrical motors coupled to them, thus so that the car presents the expected and appropriate behavior. First, Simulink/Matlab models were run in order to achieve the design of a fuzzy controller for the adjustment of both rear wheels angular speeds. Later, a feedforward neural network was trained in order to reproduce the exact control surface of the fuzzy controller. The neurofuzzy controller was then evaluated by comparing its performance to classic control techniques.*

Keywords: *Hybrid Vehicle, Vehicular Dynamics, Modeling, Mechatronics, Neurofuzzy Controller*